

Методический материал разработан доц. Калишуком Д. Г. и доц. Саевичем Н. П.

Рекомендации к выбору и расчетам выпарных аппаратов

Выпаривание растворов чаще всего проводят в вертикальных трубчатых аппаратах. Данные выпарные аппараты бывают с естественной и принудительной циркуляцией раствора и пленочные. Аппараты с естественной циркуляцией бывают с кипением в зоне нагрева (в трубах) и с вынесенной зоной кипения. Принудительная циркуляция раствора создается осевыми насосами, зона кипения у них вынесенная. Пленочные аппараты бывают с падающей (пленка раствора стекает вниз) и восходящей (пленка движется по трубам вверх) пленкой. Выбор типа выпарного аппарата зависит в первую очередь от свойств раствора: вязкости, термостойкости, склонности к кристаллизации, образованию накипи и т. д. Рекомендации к выбору типа выпарного аппарата можно найти в [1-10].

Выпарной аппарат по своей сущности является теплообменным аппаратом. В вертикальных трубчатых выпарных аппаратах в межтрубном пространстве конденсируется насыщенный водяной пар, в трубном пространстве – кипит раствор. Специфика выпарных аппаратов заключается в том, что при кипении раствора меняется его состав, в нем увеличивается концентрация растворенного вещества. Кроме того, температура кипения раствора t_k больше температуры кипения чистой воды – растворителя. Целью расчета выпарного аппарата является определение производительности аппарата, температуры кипения раствора в нем, поверхности теплоотдачи.

По заданию, которое выдается студенту, известными являются производительность выпарной установки по исходному (или упаренному) раствору, составы исходного и упаренного растворов, его природа, давление в конденсаторе. Количество корпусов (выпарных аппаратов) установки студент выбирает самостоятельно или берет соответственно заданию.

Методика и последовательность расчета многокорпусных выпарных установок подробно описана в пособиях [9-11]. Известно, что для студентов часто определенную сложность составляют расчеты однокорпусной установки, по существу, отдельного выпарного аппарата.

Расчет и обоснование однокорпусной выпарной установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) выбрать соответственно раствору тип выпарного аппарата, если он не задан;
- 2) рассчитать материальный баланс;
- 3) определить ориентировочную поверхность теплопередачи выпарного аппарата и соответственно ей подобрать выпарной аппарат;
- 4) определить температуру кипения раствора;
- 5) определить параметры греющего пара и величину полезной разности температур;
- б) рассчитать тепловой баланс аппарата;

7) для выбранного выпарного аппарата рассчитать коэффициент теплопередачи;

8) уточнить поверхность теплопередачи и сравнить ее с поверхностью выбранного выпарного аппарата.

Пояснения по последовательности выполнения расчетов выпарного аппарата.

К п. 2. Расчет материального баланса проводят с использованием нижеприведенных уравнений. При этом определяют расход вторичного пара и расход упаренного (исходного) раствора.

$$W = G_{\text{н}} \left(1 - \frac{x_{\text{н}}}{x_{\text{к}}} \right); \quad (1)$$

$$W = G_{\text{к}} \left(\frac{x_{\text{к}}}{x_{\text{н}}} - 1 \right); \quad (2)$$

$$W = G_{\text{н}} - G_{\text{к}}, \quad (3)$$

где W , $G_{\text{н}}$ и $G_{\text{к}}$ – расходы вторичного пара, исходного и упаренного растворов соответственно, кг/с;

$x_{\text{н}}$ и $x_{\text{к}}$ – массовые доли растворенного вещества в исходном и упаренном растворах соответственно, кг/кг.

К п. 3. Ориентировочная поверхность теплопередачи $F_{\text{оп}}$, м²:

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q_{\text{оп}}}{q_{\text{оп}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{оп}}$ – ориентировочный расход тепла на выпаривание, Вт;

$q_{\text{оп}}$ – ориентировочное значение удельной тепловой нагрузки, Вт/м².

$$Q_{\text{оп}} = W r_{\text{бк}} + G_{\text{н}} c_{\text{н}} (t_{\text{бк}} - t_{\text{н}}), \quad (5)$$

где $r_{\text{бк}}$ – удельная теплота образования вторичного пара при давлении в конденсаторе, Дж/кг;

$c_{\text{н}}$ – теплоемкость исходного раствора, Дж/(кг·°С);

$t_{\text{бк}}$ – температура вторичного пара в конденсаторе, °С;

$t_{\text{н}}$ – температура исходного раствора, °С.

Температуру $t_{\text{бк}}$ берут как температуру насыщенного пара при давлении $P_{\text{бк}}$, Па. Для аппаратов с естественной циркуляцией $q_{\text{н}} = (2...5) \cdot 10^4$, Вт/м², с принудительной – $q_{\text{н}} = (4...8) \cdot 10^4$, Вт/м². Выпарной аппарат выбирают по [7, 11, 14], поверхность его принимают с запасом по отношению к величине $F_{\text{оп}}$, учитывая таким образом потери тепла и то, что температура кипения раствора больше чем $t_{\text{бк}}$ (истинный расход тепла больше чем $Q_{\text{оп}}$).

К п. 4. Температуру кипения раствора $t_k, ^\circ\text{C}$, рассчитывают по формуле

$$t_k = t_{\text{бк}} + \Delta' + \Delta'' + \Delta''', \quad (6)$$

где Δ' , Δ'' , Δ''' – физико-химическая, гидростатическая и гидравлическая депрессии соответственно, $^\circ\text{C}$.

Величину Δ''' принимают равной $1-2^\circ\text{C}$. Затем рассчитывают температуру вторичного пара в выпарном аппарате $t_w, ^\circ\text{C}$ по формуле:

$$t_w = t_{\text{бк}} + \Delta'''. \quad (7)$$

По значению t_w определяют давление вторичного пара над кипящим раствором в аппарате P_w , Па. Величину гидростатической депрессии вычисляют только для аппаратов с естественной циркуляцией раствора и кипением его в трубах. Для этого рассчитывают давление в среднем слое раствора $P_{\text{ср}}$, Па, по одному из уравнений, простейшим из которых является следующее:

$$P_{\text{ср}} = P_w + 0,25\rho_p \cdot g \cdot H_{\text{тр}}, \quad (8)$$

где ρ_p – плотность раствора, кг/м^3 ;
 g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;
 $H_{\text{тр}}$ – высота труб выпарного аппарата, м.

ρ_p определяют при температуре t_w и концентрации x_k по справочнику [13], высота труб может быть равной 3, 4 или 5 м. [7, 14]. По справочнику [13] можно определить также теплоемкость, теплопроводность, вязкость растворов.

По величине $P_{\text{ср}}$ определяют температуру кипения чистого растворителя $t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$, а затем гидростатическую депрессию по формуле:

$$\Delta'' = t_{\text{ср}} - t_w. \quad (9)$$

Физико-химическую депрессию можно рассчитать по формуле Тищенко [11]:

$$\Delta' = \frac{16,2\Delta'_{\text{атм}} \cdot (t + 273)^2}{r_w}, \quad (10)$$

где $\Delta'_{\text{атм}}$ – температурная депрессия при атмосферном давлении, $^\circ\text{C}$;
 t – температура, $^\circ\text{C}$;
 r_w – удельная теплота парообразования при температуре t , Дж/кг.

$\Delta'_{\text{атм}}$ берут из [9–11] для аппаратов с циркуляцией в соответствии с составом упаренного раствора x_k , для пленочных – по средней массовой доле растворенного вещества в растворе $x_{\text{ср}} = (x_n + x_k)/2$. В формуле (10) для аппаратов с кипением раствора в трубах $t = t_{\text{ср}}$, для аппаратов с вынесенной зоной кипения $t = t_w$.

К п. 5. Температуру греющего пара $t_{\text{гп}}, ^\circ\text{C}$, принимают на $15-30^\circ\text{C}$ больше, чем t_k . Давление греющего пара (в МПа) рекомендуется принимать из ряда дав-

лений: 0,12; 0,15; 0,20; 0,25; 0,3; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 2,0. Полезная разность температур для аппаратов с кипением в трубах и пленочных $\Delta t_{\text{пол}}, ^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_{\text{пол}} = t_{\text{гп}} - t_{\text{к}}. \quad (11)$$

Для аппаратов с вынесенной зоной кипения и принудительной циркуляцией

$$\Delta t_{\text{пол}} = t_{\text{гп}} - (t_{\text{к}} + 0,5 \cdot t_{\text{пер}}), \quad (12)$$

где $\Delta t_{\text{пер}}$ – температура перегрева раствора, $^\circ\text{C}$;

$$\Delta t_{\text{пер}} = \frac{W(i_{\text{w}} - c_{\text{в}} t_{\text{к}}) + G_{\text{н}} c_{\text{н}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}})}{M \cdot c_{\text{н}}}, \quad (13)$$

где i_{w} – удельная энтальпия вторичного пара при t_{w} , Дж/кг;

$c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, Дж/(кг· $^\circ\text{C}$);

M – массовый расход раствора, который циркулирует, кг/с.

$$M = \frac{0,25 w \rho_{\text{к}} F d}{H_{\text{тр}}}, \quad (14)$$

где w – скорость раствора в трубах, м/с;

$\rho_{\text{к}}$ – плотность упаренного раствора, кг/м³;

F – поверхность выбранного выпарного аппарата, м²;

d – внутренний диаметр труб, м.

Для аппаратов с естественной циркуляцией $w = 0,6\text{--}0,8$ м/с, с принудительной $w = 2,0\text{--}2,5$ м/с [11].

К п. 6. Расчет расхода тепла на выпаривание Q , Вт, рассчитывают по формуле:

$$Q = 1,05 [G_{\text{н}} c_{\text{н}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) + W (i_{\text{w}} - c_{\text{в}} t_{\text{к}})]. \quad (15)$$

Коэффициент 1,05 учитывает потери тепла (5%) в окружающую среду. В формуле (15) тепло на дегидратацию не учтено.

Расход греющего пара $D_{\text{гп}}$, кг/с:

$$D_{\text{гп}} = \frac{Q}{r_{\text{гп}} \varphi}, \quad (16)$$

где $r_{\text{гп}}$ – удельная теплота конденсации греющего пара, Дж/кг;

φ – степень сухости греющего пара (обычно принимают $\varphi = 0,95$).

Удельный расход греющего пара d , кг/кг:

$$d = \frac{G_{\text{гп}}}{W}. \quad (17)$$

К п. 7. Для расчета коэффициента теплопередачи K , Вт/(м²·°С), определяют коэффициент теплоотдачи от греющего пара α_1 , Вт/(м²·°С) и к кипящему раствору α_2 , Вт/(м²·°С). Расчеты α_1 и α_2 проводят по методике, представленной в пп. 6–14 «Рекомендации к выбору и расчетам кожухотрубчатых теплообменников». Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{\text{сум}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (18)$$

где $\sum r_{\text{сум}}$ – суммарное термическое сопротивление стенки трубы и загрязнений на ней, (м²·°С)/Вт.

Коэффициент теплоотдачи α_2 рассчитывают [11]:

- для аппаратов с кипением в трубах по формуле (4.15);
- с вынесенной зоной кипения и вынужденной циркуляцией – по (4.18), с учетом (4.19);
- пленочных – по (4.16), (4.17).

К п. 8. Уточненная поверхность теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{пол}}}. \quad (19)$$

Расчетное значение F должно быть на 10–25% меньше, чем поверхность выбранного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.
2. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн. – М.: Химия, 1995.
3. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн. – М.: Химия, 1981.
4. Справочник химика / Под ред. Б. П. Никольского. Т.5. – М.: Химия, 1966.
5. Перри Дж. Справочник инженера-химика: В 2-х кн. – М.: Химия, 1969.
6. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987.
7. Выпарные трубчатые аппараты общего назначения для химических производств. Каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1985.
8. Таубман Е. И. Выпаривание. – М.: Химия, 1982.
9. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. Н. Флисюк и др. – СПб.: Химия, 1993.

10. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987.

11. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991.

12. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. / Пер. с англ., под. ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. Т. 1,2. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

13. Зайцев И. Д., Асеев Т. Т. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ. – М.: Химия, 1988.

14. ГОСТ 11987-81. Аппараты выпарные трубчатые.